대구경 현장타설말뚝의 소켓 벽면 거칠기 측정장치(SRPS)에 사용되는 소나센서부의 개발 및 검증에 관한 연구

A Study on the Development and the Verification of a Sonar Sensor System of a Socket Roughness Measurement Device for A Large-diameter Drilled Shaft

전 병 한¹ Jeon, Byeong-Han

최 용 규² Choi, Yong-Kyu

Abstract

A sonar sensor system of a new socket roughness profiling system (SRPS) which can measure the socket roughness of the large-diameter drilled shafts under the in-situ condition was developed and verified. In model tests, the salinity, temperature, and high-turbidity have been changed for simulating the in-situ borehole water conditions. From the test results, it was found that the sonar sensor can measure the distance within an accuracy of 1mm. Because of the wave form characteristics of sonar sensor, the relative error exists in case of the inclined and curved surface, however, the shape of specimen was confirmed relatively exactly using the developed sonar sensor. Moreover, the salinity, temperature, and high-turbidity did not affect the measured data of socket roughness.

요 지

현장타설말뚝의 시공현장에서 소켓 벽면의 거칠기를 측정할 수 있는 거칠기 측정장치의 소나센서부를 개발하였으며 검증시험을 실시하였다. 모형 검증시험에서는 현장 굴착공내수 조건을 모사하여 염도, 온도, 혼탁도를 변화시켰다. 시험 결과를 통해 센서의 정밀도는 1mm임을 확인할 수 있었고 소나센서의 파형 특성상 경사면과 곡면의 측정값이 일부 분산되는 경우가 있었지만 시험에 사용된 모형의 형상은 비교적 정확하게 확인할 수 있었다. 또한 소나센서의 측정값은 염도, 온도, 혼탁도의 변화에 의한 영향을 받지 않음을 알 수 있었다.

Keywords : Sonar sensor, A new socket roughness profiling system (SRPS), Socket roughness, The large-diameter drilled shafts, In-situ condition

1. 서 론

암반의 근입된 현장타설말뚝의 주면마찰력은 암석의 일축압축강도 외에 소켓 벽면의 거칠기, 초기 수직응력,

말뚝의 직경 등에 의해 크게 영향을 받는다. 특히 소켓 벽면의 거칠기는 주면마찰력을 평가하는 데 큰 영향을 미치게 되는데 여러 학자들이 암반 소켓 벽면 거칠기의 영향을 거칠기 계수(RF; Horvarth et al., 1983), 무차원

1 정회원, 경성대학교 토목공학과 박사과정 (Member, Ph.D student, Dept. of Environment Civil Engineering, Kyungung Univ.)

2 정회원, 경성대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Environment Civil Engineering, Kyungung Univ., Tel: +82-51-663-4753, Fax: +82-51-621-0729, ykchoi@ks.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2013년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

거칠기 계수, Ψ (Kulhawy and Phoon, 1993), 주변저항계수(SRC; Seidel and Collingwood, 2001) 등으로 평가하였다. 또한 국내에서는 현장재하실험과 수치해석을 통해 국내의 암반 거칠기를 반영하여 하중전이함수를 제안한 Kim et al.(1999), 일정수직강성(CNS) 조건의 직접전단시험을 통해 말뚝-암반 경계면 거동을 연구한 Cho et al.(2003) 그리고 Seol et al.(2006) 등의 연구들이 있다. 하지만 이러한 연구들에서는 공내 지하수 및 해수 유입, 공내 산소 결핍, 수압 및 토압에 의한 공벽붕괴 등의 위험성을 내포한 상태에서 굴착공 벽면의 분을 뜯 후 거칠기 시편을 성형하는 방법을 사용하였다. 또한 소켓 벽면의 한 부분만을 측정하기 때문에 전체적인 거칠기를 측정할 수 없는 문제점이 있었다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 국내·외에서 몇몇의 측정 장치들이 개발되었지만 상용화가 아닌 연구목적으로 개발되었거나 현장 조건들(수중조건, 심한 혼탁도조건 등)을 해결하지 못하여 실질적으로 현장에 적용하기에는 무리가 따랐다.

본 연구에서는 소켓 벽면의 거칠기 측정 시 발생할 수 있는 여러 위험성을 제거하고 실제 대구경 현장타설 말뚝 시공현장에서 발생할 수 있는 다양한 조건에서 거칠기를 측정할 수 있는 거칠기 측정장치(SRPS)에 사용할 소나센서부를 개발하였다. 또한 개발된 소나센서부에 대한 검증시험을 수행하였으며 그 결과를 분석하였다.

2. 국내·외 기술수준 고찰

2.1 국외 기술수준 고찰

국외에서 제작된 거칠기 측정장치 및 유사 장치는 일본 Kodan Electronic Co., Ltd.에서 제작된 DM-602/604(Kodan Electronics Co., Ltd., 2009), 휴스턴 대학교의 거

Fig. 1. Test results for SDM-602-604

칠기 측정 시스템(Nam, 2004), Monash대학교의 SocketPro(Collingwood, 2000)가 있었다.

DM-602/604는 초음파 센서를 이용한 장치로 굴착공의 직경 및 수직도 등을 조사하는데 주로 사용되었으며 굴착공 벽면의 거칠기를 측정할 수 있으나 Fig. 1과 같이 대략적인 형상만을 도시하는 수준이어서 신뢰성이 크게 떨어지는 것으로 판단되었다.

Fig. 2는 휴스턴 대학교의 거칠기 측정 시스템으로 레이저 센서부, 엔코더부 및 데이터 수집 컴퓨터부 등 크게 3가지 주요 부분으로 구성되어 있었으며 AC-DC 컨버터는 연결박스에 설치되어 엔코더와 레이저 장치에 전원을 공급하였다. 켈리바(Kelly Bar)에 부착된 거칠기 측정 시스템은 상·하로 이동하여 굴착공의 벽면 거칠기를 측정하며 레이저 센서부, 엔코더부가 연결박스로 측정 데이터를 송출하는 방식이었다. 2002년 5월 24일 휴스턴대학교 공대 건물 부근에서 깊이 1.83m의 홀을 천공하여 휴스턴 대학교 거칠기 시스템으로 천공된 홀의 거칠기를 측정하였다. 켈리바(Kelly Bar)에 거칠기 측정 시스템을 부착하여 천공된 홀 1.83m의 거칠기를 측정하였으나 측정을 하는 동안 수평방향으로 약 2.54cm 정도의 흔들리는 문제점이 있었고, 레이저 센서부는 길이 27.80cm, 폭 21.02cm, 높이 7.71cm, 무게 약 13.33N으로 다른 사용제품에 비해 비교적 크게 제작되어 사용성에 대한 문제가 있었다. 또한 방수시스템이 제대로 갖춰지지 않아 수중에서 사용이 불가능하였다.

Monash대학교의 SocketPro(Piletech Co., Ltd., 2004)는 굴착벽면의 프로파일을 정밀하게 측정하기 위하여 레이저를 이용한 거리 측정 기술을 도입하였고 펄스 레이저

Fig. 2. Houston univ. socket measurement system (Nam, 2004)

Photo 1. Socket pro (PILETECH Co., Ltd., 2004)

센서를 사용하여 반사파의 도착시간을 이용하여 거리를 측정하였다. 센서의 유효측정영역은 100mm이었으며 Photo 1에 SocketPro의 실물을 나타내었다. 이 측정 장치는 휴스턴 대학교의 거칠기 측정 시스템과 달리 수중에서도 사용할 수 있었으나 혼탁도가 있는 상황에서는 측정이 불가능하였다.

2.2 국내 기술수준 고찰

국내에서 개발된 장치는 BKS-LRPS(Backyoung-Kyungsung Laser Roughness Profiling System)(Park, 2007)와 현대건설의 굴착면 거칠기 탁본장비(한국건설기술연구원, 2012)가 있었다.

Photo 2. BKS-LRPS (Park, 2007)

Photo 3. Sokect roughness rubbing device (KICT, 2012)

Photo 2는 BKS-LRPS로 기중 및 수중에서도 모두 측정이 가능하였으며 높은 수압을 견딜 수 있는 방수 시스템을 갖추고 있었다. 또한 인체에 안전한 빔(Class 2)을 사용하고 측정 중에도 눈으로 볼 수 있는 가시광선 영역(650nm)을 선택하여 사용하였다. 현재 개발된 거칠기 측정 장치 중 정밀도가 가장 높았으며 실제 국내 현장에서 시험을 한 사례도 있었다. 하지만 염분 3%를 초과할 경우 정상적인 작동이 힘들었고 혼탁도가 있는 상황에서는 유효 측정영역이 변화하여 측정값의 신뢰도가 떨어지거나 측정이 불가능한 문제점이 있었다.

Photo 3은 현대건설에서 개발한 굴착면 거칠기 탁본 장비로 다른 측정 장치들과는 달리 간단한 구조로 구성되어 있어 측정시간이 짧고 이동성이 좋았다. 또한 혼탁도 및 수압에 영향을 받지 않았다. 하지만 소켓 벽면 일부의 거칠기만 탁본하는 단점이 있었다.

3. 거칠기 측정용 소나센서부 개발

3.1 개요

개발될 거칠기 측정장치는 3가지 주요 부분(즉, 소나센서부, 측정장치부, 고정장치부)으로 구성되어 있었는데 소나센서부는 이 중 가장 중요한 핵심부분이었다. 기존에 개발된 레이저빔을 이용한 거칠기 측정장치들은 수압, 방수, 염분, 혼탁도 등의 영향을 크게 받아 여러 조건들이 존재하는 실제 현장에 적용하기 힘들다고 판단되었다. 특히 현장에서 소켓 벽면의 거칠기 측정 시 혼탁도가 가장 큰 장애요소였다. 이를 해결하기 위해 소나센서를 이용하여 거칠기 측정용 소나센서부를 개발하였다.

3.2 소나센서 개발

개발된 소나센서(SONAR; Sound Navigation And Ranging)는 초음파센서의 일종이며 그 파형이 방사형으로 퍼져나가 센서와 측정하고자 하는 물체 사이에 존재하는 부유물이나 혼탁도에 영향을 거의 받지 않았다. 설계 목표는 최대 정밀도는 1.0mm, 굴착공 벽면과의 최소 측정거리는 15.0mm, 측정거리 오차는 $\pm 0.5\%$, 측정 가능 혼탁도는 500NTU 이상, 최대 내압력은 1MPa로 하였으며 Photo 4에 실물을 나타내었다.

3.3 소나센서용 하드웨어 개발

소나센서에서 측정된 값을 수신하여 처리하는 메인 프로세서로는 DSP(Digital Signal Processor)를 사용하였다. DSP는 주로 디지털 신호의 고속처리를 위해 덧셈, 뺄셈, 곱셈 등의 반복 연산을 고속으로 처리하는 회로이며 TMS320F2812 DSP 모델을 사용하였다. 이 모델은 32비트 CPU 코어(core)가 탑재되어 있고 150MHz의 고속연산, 12비트 ADC와 PWM발생회로, QEP, CAP 신호를 받을 수 있는 이벤트 매니저(Event Manager)가 탑재되었다. 또한 CPLD(Complex Programmable Logic Device)

를 사용하여 소나센서가 정확한 2MHz의 음파를 생성하도록 하였으며 VHDL이라는 전용 언어로 인코딩하여 보드 크기를 소형화 하였다.

메인 프로세서와 컴퓨터간의 통신을 위해 TCP/IP 모듈(Transmission Control Protocol/Internet Protocol Module)을 사용하였다. 일반적으로 사용되는 간단한 통신방식은 RS232, SCI, SPI 등이 있는데 컴퓨터와의 통신은 주로 RS232, USB 및 TCP/IP방식이 주로 사용되었다. 이 중 가장 사용이 간편한 것은 RS232였으나 현장 적용성을 고려하여 TCP/IP 모듈을 적용하였고, 16비트 A/D 컨버터, 송신부, 수신부, 회로 다이어그램 등을 조합하여 소나센서용 하드웨어를 제작하였다.

3.4 소나센서용 소프트웨어 개발

수신된 신호를 이미지화 하여 데이터를 추출할 수 있으며 사용하는 채널만 표시가 가능하도록 하였다. 또한 탐색 거리 설정을 50cm 씩 조정할 수 있게 하였으며 최대 500cm 까지 설정 가능하게 하였다. 프로그램 설정 창에서는 TVG(Time Varied Gain), PWD(Pulse Width), 게인(Gain), 블랭크(blank), 드래프트(Draft), 쓰레스홀드(Threshold) 등을 조절할 수 있게 하였다.

소나센서용 하드웨어와 소프트웨어의 통신을 위해 랜선을 이용하였으며 소나센서에서 측정된 값은 소나센서 전용프로그램으로 전달되어 데이터 처리 후 마이크로소프트사의 엑셀 파일로 결과값을 도출하게 하였다.

4. 소나센서의 검증 및 결과 분석

4.1 검증 시험 계획 및 준비

실제 대구경 현장타설말뚝 시공현장의 굴착공내수는 담수이거나 해수이며 온도는 $5^{\circ} \sim 20^{\circ}$ 정도였다. 또한 굴착공내에는 현장에서 발생하는 각종 오수 및 부유물과 벤토나이트 안정액이 뒤섞여 있어 혼탁도가 적게는 300NTU에서 많게는 800NTU 정도였다. 이러한 현장조건을 고려하여 거칠기 측정용 소나센서의 검증 시험을 실시하였고 자세한 시험조건은 Table 1과 같다. 여기서 센서정밀도, 거칠기 형상, 현장조건(해수, 공내수, 공내수, 혼탁도)을 모사할 수 있도록 시험 계획을 수립하였다.

검증시험에는 Photo 5와 같이 총 6가지의 시편을 사

Photo 4. Sonar sensors

Table 1. Verification test terms of the sonar sensor

Classification	Terms	Type of specimen
Accuracy	Arranged in tiers Clearance: 0.5mm	Specimen A
	Arranged in tiers Clearance: 1.0mm	Specimen B
Shape	Square	Specimen 1
	Triangle	Specimen 2
	Trapezium	Specimen 3
	Oval	Specimen 4
Salinity 3.5%	Arranged in tiers Clearance: 0.5mm	Specimen A
	Arranged in tiers Clearance: 1.0mm	Specimen B
Temperature	5°	Specimen 1, 2, 3, 4
	10°	
	20°	
Turbidity	200NTU	Specimen 1, 2, 3, 4
	600NTU	
	1,000NTU	
	Site (480NTU)	

용하였다. 센서의 정밀도 모형 검증 시험에 사용한 시편은 강재로 제작하였다. 시편 A는 계단형 모양으로 계단 폭 30.0mm, 계단 간의 단차는 0.5mm이었고 시편 B는 계단 폭은 동일하지만 계단 간의 단차는 1.0mm이었다. 거칠기 형상의 모형 검증 시편은 목재로 제작하였는데.

Fig. 3. Flow chart of verification test

시편 1은 높이 10.0mm, 폭 10.0mm의 정사각형 모양, 시편 2는 높이 14.0mm, 폭 28.0mm의 삼각형 모양, 시편 3는 윗변 20.0mm, 아랫변 48.0mm, 높이 14.0mm의 사다리꼴 모양, 시편 4는 높이 10.0mm, 폭 26.0mm의 타원형 모양이었다.

기계부가 개발되지 않은 상황에서 소나센서를 검증

(a) Specimen A (clearance 0.5mm)

(b) Specimen B (clearance 1.0mm)

(c) Specimen 1 (H:10mm L:10mm)

(d) Specimen 2 (H:14.0mm L:28.0mm)

(e) Specimen 3 (H:14.0mm LL:48.0mm)

(f) Specimen 4 (H:10mm L:26mm)

Photo 5. Verification test specimens

하기 위해서는 엔코더 역할을 대신할 장치와 센서를 고정 및 이동시킬 수 있는 시험대가 필요하였다. 엔코더 역할을 대체하기 위해 아트메가(ATmega)와 보드를 결합한 장치를 제작하였고 액츄에이터(actuator)와 스텝핑 모터(Stepping motor)를 결합하여 1.0mm 단위로 센서를 이동할 수 있게 하였다. 시험 순서는 Fig. 3과 같으며 측정센서가 1.0mm 이동할 때 마다 동일 위치를 10회 측정하도록 하였다.

4.2 소나센서의 정밀도에 관한 모형 검증 시험 결과 및 분석

정밀도 1.0mm로 개발된 소나센서가 정상적으로 작동하는지 확인하기 위하여 담수 조건에서 시편 A와 시편 B를 측정해 보았다. Fig. 4(a)에는 시편 A의 측정값을 나타내었는데 센서가 1.0mm 움직였을 때 어떠한 보정 작업 없이 측정한 10개의 값을 모두 도시하였다. 시편의 실측값은 실선으로 나타내었다. 시편 A에서는 첫 번째

(a) Specimen A

(a) Specimen B

Fig. 4. Test result of accuracy

(a) Specimen 1

(b) Specimen 2

(c) Specimen 3

(d) Specimen 4

Fig. 5. Measurements of shape specimens

계단은 정확하게 측정되었으나 0.5mm가 올라간 두 번째 계단은 0.0mm와 1.0mm로 측정되었다. 이는 측정센서의 정밀도를 1.0mm를 목표로 개발하였기 때문에 1.0mm미만의 측정값은 반올림 또는 내림 처리되어 두 계단의 높이차 0.5mm를 1.0mm나 0.0mm로 인식하게 된 것으로 판단되었다. Fig. 4(b)는 시편 B의 측정값으로 시편 B의 실제 형상과 측정값이 정확히 일치함을 볼 수 있었다. 첫 번째 계단의 폭 30.0mm와 1.0mm가 올라간 두 번째 계단의 폭 30.0mm를 정확하게 측정하였다. 이를 통해 측정센서의 정밀도는 최대 1.0mm임을 확인할 수 있었다.

4.3 거칠기 형상에 관한 모형 검증 시험 결과 및 분석

실제 암반 소켓의 벽면은 매끈한 원통형이 아닌 다양한 형상을 띠고 있다. 이러한 조건에서도 소나센서가 소켓 벽면을 정확히 측정할 수 있는지 검증할 필요가 있어 거칠기 형상 검증용 시편들을 이용하여 모형 검증 시험을 실시하였고 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

시편 1의 측정값은 실제 형상과 정확히 일치하였으며 사각모양의 형상 또한 확인할 수 있었다. 하지만 시편 2, 3, 4는 동일한 위치에서 측정된 10개의 값이 동일하게 나타나지 않았으며 실제 형상 주위로 분산되었다. 소나센서의 파형특성으로 인하여 소나센서는 빔 각 2°의 방사형으로 신호를 발신하게 되는데 경사면과 곡면의 경우 측정하고자 하는 지점과 높이가 다른 인근 지점에서 거의 동시에 음파를 반사하게 되고 반사된 신호 중 가장 빠르게 수신된 신호를 인식함에 따라 동일 지점에서의 10회 측정된 값들 중 일부가 1.0~3.0mm범위내의 값으로 분산된 것으로 판단되었다.

거칠기 형상의 모형 검증 시험 결과를 통해 소나센서는 평면 측정은 정확하게 할 수 있었지만 경사면과 곡면에는 정밀도가 평면보다 떨어지는 것을 알 수 있었다. 따라서 측정값에 대한 산점도와 히스토그램을 통해 측정 오차를 분석하였다. Fig. 6은 경사면과 곡면 측정 시 발생한 오차에 대한 산점도이며 수평축은 센서와 시편과의 실제 거리, 수직축은 참값에서 측정값을 뺀 오차이다. Fig. 7은 발생오차에 대한 히스토그램이며, 수평축

Fig. 6. Scatter diagram analysis about measurement errors of slope and curved surface

Fig. 7. Histogram analysis about measurement errors of slope and curved surface

은 오차값이고 수직축은 발생빈도이다. Fig. 6에서 산점도 분석 결과 이상치(Outlier)에 대한 보정이 없었으므로 몇 개의 튀는 값들이 존재하였다. 그러나 측정값과 실측값이 일치하는 수직축 0을 기준으로 오차들은 측정거리에 따라 선형성을 보이지 않고 무작위(Random)로 분포되었으며 산포의 변화 또한 보이지 않았다. 이는 측정값에 대한 오차보정이 이루어진다면 참값과 실측값이 일치할 수 있음을 의미한다. Fig. 7의 히스토그램을 통해서 는 경사면 측정 시 평균 측정오차는 0.005mm, 곡면 측정 시 평균 측정오차는 0.003mm이었고 2개 값 모두 소나센서의 기계오차인 0.005mm내에 들었음을 알 수 있었다. 따라서 곡면과 경사면에서 발생하는 측정거리 오차는 시편의 형상의 영향을 거의 받지 않았지만 소나센서의 파형 특성에 의한 영향은 배제할 수 없었다.

4.4 해수조건을 고려한 모형 검증 시험 결과 및 분석

기존에 개발된 장비들은 방수처리가 되지 않아 수중에서 거칠기 측정이 불가능하거나 가능하더라도 염도 3.5% 정도의 해수에서는 정상적으로 작동하지 않는 애로 사항이 있었다. 이 점을 고려하여 개발한 거칠기 측정센서부가 해수에서 정상적으로 작동하는지 확인할 필요가 있었다. 시험에 사용된 시편은 시편 B이며 측정 결과는 Fig. 8에 나타내었다. 측정결과는 측정값과 실제 형상이 일치하였다.

4.5 공내수온을 고려한 모형 검증 시험 결과 및 분석

소나센서는 파를 전달하는 매질의 온도에 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 거칠기 측정용 소나센서도 매질

Fig. 8. Measurements of specimen B (salinity 3.5%)

의 온도변화에 의한 영향을 검증할 필요가 있었다. 실제 현장의 굴착공내수의 온도를 조사해 본 결과 5°~20°이었으므로 검증 시험에서는 물의 온도를 5°, 10°, 20°로 변화시켰으며 시편 1~4를 측정하였다.

온도변화에 따른 측정값의 정확도 및 오차 변화를 확인하기 위해서 형상 중 가장 불리한 조건인 시편 4(곡면)의 측정값을 Fig. 9에 나타내었으며 그 측정값의 산점도와

(a) 5°

(b) 10°

(c) 20°

Fig. 9. Measurements of curved surface (Temperature variation)

히스토그램을 분석하여 Fig. 10과 11에 각각 나타내었다.

물의 온도가 변화하여도 평면 시편의 측정값은 변화가 없었으며 폭과 높이, 모형 형상을 정확하게 확인할 수 있었다. 삼각형, 사다리형, 곡면형 시편의 측정값은 실제 형상과 정확하게 일치하지는 않았으나 그 경향은 거칠기 형상의 측정결과와 유사하였다. Fig. 10에서 알 수 있듯이 온도가 변하더라도 오차는 측정거리에 따라

(a) 5°

(b) 10°

(c) 20°

Fig. 10. Scatter diagram analysis about measurement errors of curved surface (Temperature variation)

선형성을 띄지 않았으며 산포의 변화도 없음을 확인할 수 있었다. 또한 히스토그램에서 평균 측정오차는 온도 5° 일 때 0.003mm, 온도 10° 일 때 0.003mm, 온도 20°일 때 0.001mm로 나타났으며 소나센서의 기계오차인 0.005mm 범위 내에 있음을 알 수 있었다.

4.6 공내수의 혼탁도를 고려한 모형 검증 시험 결과 및 분석

굴착공내에는 현장에서 발생하는 각종 오수, 부유물과 벤토나이트 안정액이 뒤섞여 있어 굴착공내수의 혼

(a) 5°

(b) 10°

(c) 20°

Fig. 11. Histogram analysis about measurement errors of curved surface (Temperature variation)

(a) 200NTU

(b) 600NTU

(c) 1,000NTU

(d) Site (480NTU)

Fig. 12. Measurements of curved surface (Turbidity variation)

(a) 200NTU

(b) 600NTU

(c) 1,000NTU

(d) Site (480NTU)

Fig. 13. Scatter diagram analysis about measurement errors of curved surface (Turbidity variation)

Fig. 14. Histogram analysis about measurement errors of curved surface (Turbidity variation)

탁도는 300~800NTU로 현장에서 거칠기 측정 시 측정 가능성을 평가할 수 있는 중요한 요인으로 판단되었다. 따라서 거칠기 측정용 소나센서의 측정 가능한 최대 혼탁도와 혼탁도가 측정값에 미치는 영향을 검증해 볼 필요가 있었다. 벤토나이트로 만든 200, 600, 1,000NTU의 벤토나이트 안정액 3종류와 실제 현장에서 채취한 480NTU의 현장채취수를 준비하여 시편 1~4를 대상으로 검증시험을 수행하였다.

혼탁도에 따른 측정값의 정확도 및 오차 변화를 확인하기 위해서 형상 중 가장 불리한 조건인 시편 4(곡면)의 측정값을 Fig. 12에 나타내었으며 그 측정값의 산점도와 히스토그램을 분석하여 Fig. 13과 14에 각각 나타내었다.

혼탁도가 변화하여도 평면 시편의 측정값은 변화가 없었으며 폭과 높이, 모형 형상을 정확하게 확인할 수 있었다. 삼각형, 사다리형, 곡면형 시편의 측정값은 실제 형상과 정확하게 일치하지는 않았으나 그 경향은 거칠기 형상의 측정결과와 유사하였다. 즉, 혼탁도에 따른 시편 1~4의 측정값들은 소나센서의 파형 특성으로 생기는 오차를 제외하면 혼탁도 변화가 측정값에 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다. 곡면 측정값의 오차를 산

점도와 히스토그램을 이용하여 분석하였으며 그 경향은 거칠기 형상 변화, 염도변화, 공내수온변화의 결과와 유사한 경향을 나타내었고 평균 측정오차는 탁도 200NTU일 때 0.005mm, 혼탁도 600NTU일 때 0.003mm, 혼탁도 1,000NTU일 때 0.002mm, 현장채취수(480NTU)일 때 0.004mm로 나타났으며 이는 소나센서의 기계오차인 0.005mm 범위 내였다.

5. 결론 및 제언

본 연구에서는 현장타설말뚝 시공 현장에서 소켓 벽면의 거칠기를 측정할 수 있는 거칠기 측정용 소나센서를 개발하였고 모형검증시험을 실시하였다. 여기서 센서 정밀도, 거칠기 형상 그리고 굴착공내수의 염도, 온도, 혼탁도를 변화시켰으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 거칠기 측정용 소나센서는 정밀도 1.0mm로 개발하였으며, 0.5mm, 1.0mm의 단차를 둔 계단형 시편을 측정해 본 결과, 단차 0.5mm 시편에서는 0.0 또는 1.0mm로 측정되었으나 단차 1.0mm 시편에서는 정

확하게 측정되었다.

- (2) 실제 현장의 소켓 벽면 거칠기는 다양한 형상을 띄고 있을 것으로 예상되었다. 따라서 다양한 형상에 대한 소나센서부의 측정여부를 확인하기 위해 사각형, 삼각형, 사다리꼴, 타원형 형상의 모형에 대한 검증을 실시하였다. 계단형 시편에서는 측정값과 실제 형상이 일치하였으나 경사면과 곡면 시편의 경우 10회의 측정값 중 몇 개의 측정값들은 1.0~3.0mm의 오차를 보였다. 이는 소나센서의 파형 특성에 따른 것으로 판단되었다. 여기서 산점도와 히스토그램을 통해 경사면과 곡면의 측정 시 발생한 오차를 분석하였는데, 산점도 분석결과 측정오차들이 선형성을 보이지 않고 실측값 주위로 무작위(Random)로 분포되었으며 산포의 변화를 보이지 않았고 히스토그램 분석결과 평균 측정오차는 소나센서의 기계오차인 0.005mm 범위 내에 있었으므로 측정값에 대한 오차 보정작업이 이루어진다면 실측값과 일치할 것으로 판단되었다.
- (3) 굴착공내수가 해수(염도 3.5%)일 조건을 고려하여 단차 1.0mm 계단형 시편에 대한 측정을 실시하였다. 측정값과 실제 형상은 일치하였으며 시편의 형상 또한 확인할 수 있었으므로 해수 중에서도 측정 가능한 것으로 판단되었다.
- (4) 공내수온의 변화가 소나센서의 측정값에 영향을 검증하기 위하여 담수의 온도를 5°, 10°, 20°로 변화시켜 검증시험을 실시하였다. 그 결과, 공내수온의 변화는 소나센서부의 측정값에 영향을 미치지 않았으며 경사면과 곡면 측정 시 발생한 측정오차 또한 정상범위 내에 존재하였다.
- (5) 굴착공내수의 혼탁도를 고려하여 벤토나이트로 만든 200, 600, 1,000NTU의 시험용 혼탁수와 현장채취수(480NTU)를 이용하여 모형 검증시험을 실시하였는데 혼탁도 변화는 측정값에 영향을 미치지 않았으며 측정 시 발생한 측정오차 또한 정상범위 내에 존재하였다.
- (6) 검증시험 결과를 통해 개발된 소나센서부를 이용하면 현장타설말뚝의 시공 현장에서 발생할 수 있는 다양한 현장조건에서도 거칠기 측정이 가능할 것으로 판단되었다. 하지만 경사면 및 곡면 측정 시 일부 측정값이 분산되는 경향은 나타나고 있었는데 이를

보완하기 위해 측정횟수를 증가시키거나 측정값의 신뢰성 분석 등을 통한 분석 방법이 제안되어야 할 것으로 생각되었다.

감사의 글

본 연구는 초장대교량 사업단(08기술혁신E01)의 지원에 수행되었으며, 이에 깊은 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Cho, C. W., Lee, M. W., Kim, S. H., Lee, H. J., and Yoo, H. K. (2003), "CNS Shear Tests for Granite-Concrete interface of drilled shaft", *KGS Spring Conference 2003*, KGS, pp.147-152.
2. Collingwood, B. (2000), "*The Effects of Construction Practices on the Performance of Rock Socket Bored Piles*", Ph. D. Thesis, Department of Civil Engineering, Monash University, Clayton, Vic., Australia.
3. Horvath, R. G., Kennet, T. C., and Kozick, P. I. (1983), "*Methods of Improving the Performance of Drilled Piers in Weak Rock*", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.20, pp.758-772.
4. KICT (2012), "Super Long Span Bridge R&D Center, 3rd Core, 3rd Subject : High efficiency construction technology development, 1st Step Report", KICTEP, Report No. 2008 Technology Innovation-B01, pp.115-116.
5. Kim, S. I., Jeong, S. S., Cho, S. H., and Park, I. J. (1999), "*Shear Load Transfer Characteristics of Drilled Shafts in Weathered Rocks*", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, pp.999-1010.
6. Koden Electronics Co., Ltd. (2009), "DM-602/604 Ultrasonic Drilling Monitor", www.koden-electronics.co.jp
7. Kulhawy, F. H. and Phoon, K. K. (1993), "*Drilled Shaft Side Resistance in Clay Soil to Rock*", *Design and Performance of Deep Foundation*, GSP No. 38, Ed. by P. P. Nelson, T. D. Smith and E. C. Clukey, ASCE, October, pp.172-183.
8. Nam, M. S. (2004), "*Improved Design for Drilled Shafts in Rock*", Ph D. Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Houston, Texas.
9. Park, B. G. (2007), "*Research on Development and Calibration of BKS-LRPS(Backyoung-KyungSung Laser Roughness Profiling System)*", Ph.D. Thesis, Kyungsung University pp.199-203.
10. Piletech Co. Ltd. (2004), "A New Improved Design Method for Drilled Shafts in Rock", KICTEP, Report No. 2001-Object A-11, pp.208-210.
11. Seidel, J. P. and Collingwood B. (2001), "*A New Socket Roughness Factor for Prediction of Rock Socket Shaft Resistance*", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. February pp.138-153.
12. Seol, H. I., Jeong, S. S., and Woo, S. Y. (2006), "Load Transfer Characteristics of Rock-Socketed Drilled Shafts Considering Hole Roughness", *KGS Spring Conference 2006*, KGS, pp.494-505.

(접수일자 2012. 9. 13, 심사완료일 2012. 11. 19)